

ДВИЖЕНИЕ ПРОФИЛЯ КРЫЛА ЗАДАННОЙ ФОРМЫ С ВЫДУВОМ РЕАКТИВНОЙ СТРУИ

М.И. Галяутдинов, Д.В. Маклаков

*НИИММ Казанского государственного университета
Marat.Galaytdinov@ksu.ru*

Предлагается метод расчета аэродинамических характеристик крылового профиля с выдувом реактивной струи через щель конечных размеров на верхней поверхности профиля. Щель моделируется бесконечнолиственным круговым каналом. Используется модель идеальной несжимаемой жидкости, плотности и полные давления выдуваемой струи и внешнего потока различны, вследствие чего на линиях схода потока возникает разрыв касательных составляющих скорости. Учет вязкости жидкости осуществляется в рамках модели пограничного слоя.

Эффективным способом повышения несущих свойств профиля является тангенциальный выдув щелевой струи на поверхность отклоненного закрылка. Такой метод может быть использован, например, для улучшения взлетно-посадочных характеристик летательных аппаратов. В работе [1] была предложена новая схема, заключающаяся в тангенциальном выдуве щелевой струи на верхнюю поверхность профиля. На основе экспериментов сделан вывод о возможности реализации несущих свойств профилей, намного превышающих достигнутые в настоящее время.

В работе [2] была решена обратная задача о построении профиля с выдувом реактивной струи по верхней поверхности профиля через щель конечных размеров. В настоящей работе исследована прямая задача.

Постановка задачи. Профиль L_0 заданной формы движется поступательно в идеальной несжимаемой жидкости с постоянной скоростью (рис. 1). Пусть V_∞ - скорость обращенного движения жидкости на бесконечном удалении от профиля, b - хорда профиля, α - угол атаки, ρ - плотность жидкости, p_∞ - давление на бесконечности.

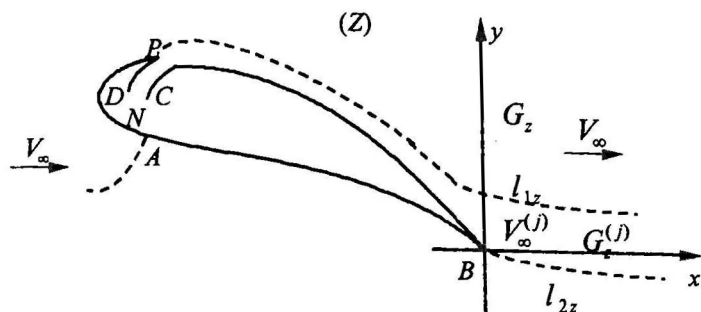


Рис. 1

На поверхности профиля имеется щель внутреннего радиуса R_s и толщиной h_s , асимптотически переходящая в бесконечнолиственный круговой канал (рис. 2). Из щели выдувается струя идеальной несжимаемой жидкости с плотностью $\rho^{(j)}$ и скоростью $V_\infty^{(j)}$ на бесконечности. Здесь и далее индексом (j) обозначаются параметры струи. В точках B и P схода потока внутренний к области течения угол принят равным 2π (бесконечно-тонкие кромки).

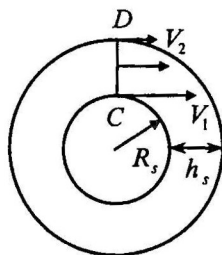


Рис. 2

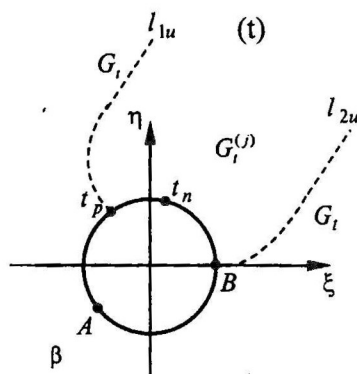


Рис. 3

Введем систему координат Oxy , жестко связанную с L_0 , направив ось абсцисс Ox по направлению скорости V_∞ . Обозначим через l_{1z} и l_{2z} линии тока, сходящиеся с острых кромок P и B профиля и разделяющие среды с плотностями ρ и $\rho^{(j)}$. При переходе через эти линии давление изменяется непрерывно, а скорость терпит скачок.

Из интеграла Бернулли найдём условия на линиях раздела:

$$\gamma \frac{V^2}{V_\infty^2} - \frac{V^{(j)2}}{V_\infty^{(j)2}} = \gamma - 1,$$

где V и $V^{(j)}$ - граничные значения скорости при подходе к линиям l_{1z} и l_{2z} из областей G_z и $G_z^{(j)}$ соответственно, $\gamma = \rho V_\infty^2 / \rho^{(j)} V_\infty^{(j)2}$ - отношение скоростных напоров в потоках на бесконечности. Требуется найти форму линий раздела, распределение скорости по поверхности профиля и его аэродинамические характеристики.

Построение профиля со щелью. Будем строить профиль со щелью путём модификации производной функции, отображающей внешность профиля Жуковского на внешность круга. Введём параметрическую плоскость (t) (рис. 3). Для взаимно однозначного конформного отображения областей G_z и G_t предполагаем соответствие бесконечно удаленных точек плоскостей (z) и (t) , а также переход точки $z=0$ в точку $t=1$.

Пусть производная отображающей функции имеет вид

$$\frac{dz}{dt} = K e^{-i\beta} \left(1 - \frac{1}{t}\right) \left(1 - \frac{t_p}{t}\right) \left(1 - \frac{t_n}{t}\right)^{\frac{a}{\pi}-1} e^{-X_0(t)}, \quad (1)$$

где $K = \left| \frac{dz}{dt}(\infty) \right|$, $X_0(t)$ - аналитическая во внешности круга функция,

такая, что $X_0(\infty) = 0$; $t_n = e^{i\gamma_n}$, $t_p = e^{i\gamma_p}$, $a = \ln \frac{V_1}{V_2} = \ln \frac{R_s}{R_s + h_s}$. Параметры K и β выбираются так, чтобы профиль имел заданную (единичную) хорду и был расположен под заданным углом атаки.

Будем вычислять ширину щели, интегрируя функцию dz/dt по малой полуокружности в плоскости (t) вокруг точки N . С помощью теории вычетов получим

$$h_s = \frac{8K\pi}{a} \operatorname{sh} \frac{a}{2} \sin \frac{\gamma_n}{2} \sin \frac{\gamma_p - \gamma_n}{2} e^{-\operatorname{Re} X_0(t_n)}.$$

Пусть, например, функция $\frac{dz}{dt} = K_g e^{-i\beta} \left(1 - \frac{1}{t}\right) e^{-X_g(t)}$ есть производная функции, отображающей внешность профиля Жуковского на внешность круга. Положим $X_0(t) = X_g(t) + \frac{a_s + i b_s}{t}$, где a_s, b_s подбираются из выполнения условий замкнутости контура профиля:

$$a_s = \cos \gamma_n - \cos \gamma_p + \frac{a}{\pi} \sin \gamma_n, \quad b_s = \sin \gamma_n - \sin \gamma_p - \frac{a}{\pi} \cos \gamma_n.$$

Тогда формула (1) задаёт функцию dz/dt для профиля со щелью. Параметр γ_p определим из условий задания ширины щели и положения γ_n точки N в параметрической плоскости.

Вывод интегральных уравнений. При сделанных предположениях во внешнем потоке и в струе существуют комплексные потенциалы потоков. Мы будем их рассматривать как единую кусочно-аналитическую функцию $w(z) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y)$, терпящую разрыв на двух линиях схода потока. Комплексно-сопряженная скорость в плоскости (t) может быть представлена в виде ([3], гл.4)

$$\frac{dw}{dt} = \left\{ \begin{array}{l} K V_\infty, \quad t \in G_l \\ K V_\infty^{(j)}, \quad t \in G_l^{(j)} \end{array} \right\} e^{-i\beta} f_0(t) e^{-X(t)}, \quad (2)$$

где

$$f_0(t) = \left(1 - \frac{t_a}{t}\right) \left(1 - \frac{1}{t}\right) \left(1 - \frac{t_p}{t}\right) \left(1 - \frac{t_n}{t}\right)^{-1}, \quad t_a = e^{i\gamma_a}, t_p = e^{i\gamma_p}, t_n = e^{i\gamma_n}.$$

Пусть s_1, s_2 – дуговые абсциссы линий l_{1u}, l_{2u} , отсчитываемые от точек t_p и t_n соответственно. Будем искать углы наклона касательных $\theta_1(s), \theta_2(s)$ кривых l_{1u}, l_{2u} . Тогда

$$u_1(s) = t_p + \int_0^{s_1} e^{i\theta_1(s)} ds \quad (l_{1u}), \quad u_2(s) = 1 + \int_0^{s_2} e^{i\theta_2(s)} ds \quad (l_{2u}).$$

Отметим, что определив $X(t)$, мы найдем и линии раздела l_{1u}, l_{2u} . В формуле (2) неизвестными являются $X(t)$ и γ_a . Запишем краевые условия для их определения:

– условие на бесконечности

$$X(\infty) = 0; \quad (3)$$

– кинематические условия на линиях раздела

$$\operatorname{Im}[X(u_k(s)) - X^{(j)}(u_k(s))] = 0, \quad k = 1, 2, \quad (4)$$

$$\theta_k(s) = \beta - \operatorname{Im}[\ln f_0(u_k(s))] + \operatorname{Im}[X(u_k(s))], \quad k = 1, 2; \quad (5)$$

– динамические условия непрерывности давления на линиях раздела

$$\lambda_k(s) = X(u_k(s)) - X^{(j)}(u_k(s)) = \ln \left[\frac{1-\gamma}{2} T + \sqrt{\left(\frac{1-\gamma}{2} T \right)^2 + \gamma} \right], k=1, 2,$$

$$\text{где } T = \left| \frac{f(t)}{f_0(t)} \right|^2 \exp(X(u_k(s)) + X^{(j)}(u_k(s))); \quad (6)$$

– кинематическое условие на единичной окружности

$$\operatorname{Im} X(e^{i\gamma}) = \delta = \frac{\gamma_a + \gamma_p - \gamma_n}{2} - \beta - \frac{\pi}{2} \quad \text{или} \quad \gamma_a = 2\delta - \gamma_p + \gamma_n + 2\beta + \pi. \quad (7)$$

Для определения пяти неизвестных $\lambda_1(s), \lambda_2(s), \theta_1(s), \theta_2(s), \gamma_a$ решаем систему уравнений (5), (6), (7) методом прямых итераций. Если предположить, что $\lambda_1(s), \lambda_2(s), \theta_1(s), \theta_2(s)$ известны, то функцию $X(t)$ можно восстановить по условиям (3), (6), (7) (см. [4]).

Результаты численных расчетов. Для решения краевой задачи (3)–(7) был использован метод комплексных граничных элементов. Алгоритм расчета был реализован в виде программы на языке Фортран 90. Проведены расчеты модифицированных профилей Жуковского при различных значениях коэффициента импульса выдуваемой струи C_I и угла атаки α . На основании этих расчетов можно сделать вывод, что при больших значениях C_I выдув реактивной струи на верхней поверхности профиля предотвращает отрыв пограничного слоя даже при очень больших углах атаки. При этом коэффициент подъемной силы достигает значений $10 \div 13$. В подтверждение этого приведены графики зависимостей $C_y(\alpha)$ при параметрах профиля Жуковского $H = 0, D = 0,2$ (рис. 4) и $H = 0,2, D = 0,2$ (рис. 5) (см. [5]). Параметры щели были взяты равными $R_s = 0,5, H_s = 0,01$, положение щели задавалось углом $\gamma_n = 180^\circ$, то есть выдув производился с носика профиля. Концы кривых на графиках соответствуют либо началу отрыва потока, либо случаю, когда точка разветвления потока совпадает с точкой схода.

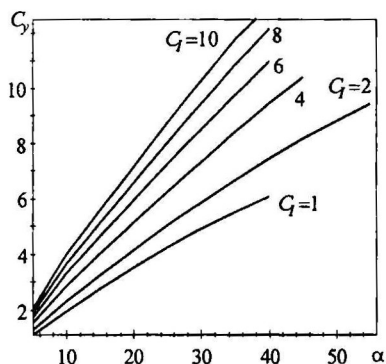


Рис. 4

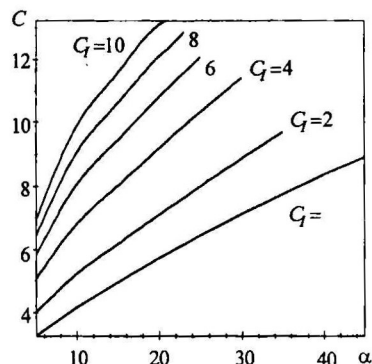


Рис. 5

ЛИТЕРАТУРА

1. Жулев Ю.Г., Иншаков С.И. *О возможности повышения эффективности тангенциального выдува целевой струи на поверхность профиля* // Изв. РАН. МЖГ. – 1996. – №4. – С.182-186.
2. Абзалилов Д.Ф., Ильинский Н.Б. *Построение крыловых профилей с выдувом реактивной струи* // Изв. РАН. МЖГ. – 1999. – №3. – С.134-143.
3. Маклаков Д.В. *Нелинейные задачи гидродинамики потенциальных течений с неизвестными границами*. – М.: Янус-К, 1997. – 280 с.
4. Мусхелишвили Н.И. *Сингулярные интегральные уравнения*. – 3-е изд. – М.: Наука, 1968. – 511 с.
5. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. *Методы теории функций комплексного переменного*. – 5-е изд. – М.: Наука, 1987. – 688 с.